

Biomed. Technik
43 (1998), 281-286

H. Oellinger
O. Wendt
C. Siewert
I. C. Park
M. Dorsch
T. C. Lüth¹
R. Felix
U. Boenick²

Effekte von para- und diamagnetischen Materialien in einem 1,5-Tesla-Hochfeld-Magnetresonanztomographen (MRT)

Effects by Paramagnetic and Diamagnetic Materials in a 1.5-Tesla Highfield Magnetic Resonance Imaging System (MRI)

Universitätsklinikum Charité Berlin, Campus Virchow, Strahlen- und Poliklinik

¹Universitätsklinikum Charité Berlin, Campus Virchow,

Klinik für Mund-, Kiefer und Gesichtschirurgie

²Technische Universität Berlin, Institut für Mikro- und Medizintechnik

Schlüsselwörter: MRT, Artefakte, Metalle, Kunststoffe, MR-Sequenzen

Dieser Artikel zeigt die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung des Störeinflusses von paramagnetischen und diamagnetischen Materialien auf die Bildgebung in einem geschlossenen 1,5-Tesla-Hochfeld-Magnetresonanztomographen (MRT). Mit drei verschiedenen Sequenztypen (SE, GE, EPI) wurden unterschiedlich große metallische und nichtmetallische Werkstückprofile hinsichtlich der entstehenden Artefakte untersucht. Zur Darstellung der Artefakte wurde ein mit Gd-Mn-Lösung gefüllter Kunststoffbehälter (Phantom) verwendet, zu dem die zu untersuchenden Materialien während der Versuchsdurchführung in definierten Abständen parallel verschoben wurden.

Die Auswertung der Schnittbilder erfolgte in transversaler und sagittaler Untersuchungsebene und ergab, daß Aluminium- und Kunststoffprofile auch bei sehr geringem Abstand zum Phantom die kleinsten Bildstörungen verursachten. Besonders starke Artefakte wurden bei den untersuchten Stahl- und Kupferprofilen festgestellt. Bei einem Vergleich der angewendeten Sequenztypen konnte nachgewiesen werden, daß besonders die SE-Sequenz, trotz der teilweise stark variierenden Materialprofile, eine geringere Artefaktanfälligkeit und somit eine höhere Stabilität in der Bildgebung im Gegensatz zur GE- und EPI-Sequenz aufwies.

Diese Untersuchungen wurden im Anschluß an eine intensive Literaturstudie (Internet, Medline, Meditec) durchgeführt. Relevante Publikationsquellen gibt es bisher nur sehr wenige.

Key words: MRI – artefacts – metals – polymers – MR-sequences

This article shows the results of an experimental investigation of the interference by paramagnetic and diamagnetic materials on imaging in a closed 1.5 Tesla high field magnetic resonance imaging system (MRI). For different types of sequences (SE, GE, EPI) the effects of metal and non-metal profiles in producing artefacts were investigated. A phantom (plastic trunk) filled with Gd-Mn-solution was used for representation of the artefacts. The materials analysed were placed parallel to the phantom at predetermined distances. The images were obtained in transverse and sagittal planes and analysed with respect to the resulting artefacts. The results show that aluminum and polymer profiles produce the weakest artefacts, even when the material is positioned close to the phantom. A comparison of the sequence types shows that the SE-sequence has a low sensitivity to artefacts, despite the great profile variation in size and shape. The SE-sequence accordingly showed a higher imaging stability as compared with the GE- and EPI-sequences. Steel and copper produced the strongest artefacts. The examination was begun after an intensive study of the literature (Internet, Medline, Meditec). So far have been few publications on this subject.

1 Einleitung

Durch die zunehmende Bedeutung der Magnetresonanztomographie in der invasiven Diagnostik und Therapie stellen sich gleichermaßen neue technische Herausforderungen bzw. steigende Ansprüche an die Entwicklung neuer MR-kompatibler medizintechnischer Produkte. Die Bildqualität der MRT-Untersuchung korreliert in hohem Maße mit den zusätzlich zu dem Patienten eingebrachten Materialien, die unter Umständen zur Ausführung von MRT-gesteuerten Eingriffen notwendig sind.

Werden Fremdmaterialien z.B. aus paramagnetischem Metall in das Magnetfeld des MR-Tomographen eingebracht, können sich aufgrund ihrer Materialspezifikationen (magnetische Suszeptibilität, elektrische Leitfähigkeit), Volumen und Anordnung im Magnetfeld unterschiedlich große Störungen der magnetischen Feldhomogenität einstellen [1–5]. Befinden sich die induzierten magnetischen Feldinhomogenitäten in der Nähe der zu untersuchenden Zonen, können unerwünschte Bildartefakte (Bildstörungen) entstehen, deren Größe und Ausdehnung im wesentlichen von der Intensität der induzierten Störfelder abhängen. Da

Bereitgestellt von | Technische Universität Berlin

Angemeldet

Heruntergeladen am | 13.11.18 11:17

Tabelle 1. Verwendete Sequenztypen und deren Sequenzparameter.

	FOV [mm]	RFOV [%]	Matrix	TE [ms]	TR [ms]	Flip-Angle [°]	Schichtdicke [mm]	Scanzeit [min]
SE (2D)	430	80	256 × 256	15	408	90	3	4:28
GE (3D)	430	80	256 × 256	4,6	10	25	3	0:58
EPI (2D)	430	80	256 × 256	9,3	19	31	3	0:33

diese Bildartefakte vermieden werden sollen, lassen sich nur bestimmte Materialien für MR-integrierte Geräte einsetzen. Beim gegenwärtigen Stand der Technik kommen hierfür in erster Linie Polymerwerkstoffe in Frage. Diese Werkstoffe lassen sich jedoch bei speziellen Problemstellungen nicht immer uneingeschränkt einsetzen, so daß alternativ dazu auf andere (z. B. auf metallische oder keramische) Materialien zugegriffen werden muß.

Aufgrund der starken magnetischen Kräfte sind ferromagnetische Materialien im allgemeinen auszuschließen, während nicht-ferromagnetische metallische Materialien wie Kupfer (Cu), Messing (CuZn) oder Aluminium (Al) ohne derartige Kraftwirkungen eingesetzt werden können. Infolge ihrer magnetischen Suszeptibilitäten und hohen elektrischen Leitfähigkeit können sie jedoch erhebliche Wirbelströme bzw. magnetische Störfelder ausbilden. Es muß mit Bildartefakten gerechnet werden.

Das Ziel dieser Arbeit war es, für zukünftige Konstruktionen in der MR-Tomographie handelsübliche Werkstoffe ausfindig zu machen, bei denen die geringsten Artefakte entstehen, bzw. das Artefaktverhalten von Werkstoffen mit zunehmendem Abstand von der zu untersuchenden ROI (Region Of Interest) zu evaluieren. Hierfür wurden sowohl metallische als auch nichtmetallische Werkstoffe mit verschiedenen Halbzeugprofilen (unbearbeitetes Materialprofil) untersucht. Zusätzlich sollte das Ausmaß der Artefakte in Abhängigkeit von verschiedenen Sequenztypen untersucht werden.

2 Material und Methodik

2.1 Material

Die Untersuchungen wurden mit einem geschlossenen 1,5-Tesla-Hochfeld-MR-Tomographen der Firma Philips (Typ: Gyroscan ACS-NT) sowie mit der Body-Coil als Sende- und Empfangsspule durchgeführt. Für die Beurteilung der Abhängigkeit des Artefaktverhaltens vom Sequenztyp erfolgten die Untersuchungen mit drei verschiedenen, für klinische Untersuchungen häufig verwendeten Sequenzen [Spin-Echo-(SE); Gradienten-Echo-(GE); Echo-Planar-Imaging (EPI)]. Die wichtigsten Sequenzparameter sind in Tabelle 1 genannt.

Zur Darstellung der Bildartefakte benutzten wir als Untersuchungsobjekt (Phantom) eine Kunststoff-(Polyethylen-)Wanne, gefüllt mit einer speziellen

Gadolinium-(Gd-)Mangan-(Mn-)Lösung (0,011 mmol Gd/l; 0,157 mmol Mn²⁺/l), mit dem Ziel, an das menschliche Gewebe angenäherte Relaxationszeiten ($T_1 = 660$ ms, $T_2 = 60$ ms) zu erhalten. Das Phantom wurde, wie in Bild 1 dargestellt, fest auf eine Grundplatte aus PMMA (Polymethylmethacrylat) montiert, die mit dem Patiententisch des MR-Tomographen fest verbunden war. Der Materialabstand zum Phantom wurde mit einer vom Phantom aus angebrachten Wegmeßskalierung (Stufenteilung = 10 mm) eingestellt. Möglichen unerwünschten Kipp- oder Drehbewegungen der Materialien während des Scannens infolge induzierter Kraftwirkungen im Material oder durch Geräteschwingungen wurde mit stabilisierenden Stützelementen aus PMMA entgegengewirkt.

Tabelle 2. Untersuchte Materialien und Profilformen.

1) Rechteckprofile aus Metall: 45 × 10 × 300 (mm) (h × b × l)
AlMgSi0,5F22 [Aluminium] E-Cu F25-30 [Kupfer]
CuZn39Pb3 [Messing] X5CrNi189 [Stahl]

2) Rundstäbe aus Metall und Kunststoff: ø 10 × 300 mm
AlMgSi0,5F22 E-Cu F25-30 CuSn6 [Bronze]
PVC PMMA GFK* CFK*

* = Faserverbundwerkstoff

3) Aluminium-Rundstäbe: AlMgSi0,5F22,
(ø 6, 8, 15, 20, 25) × 300 mm

4) Aluminiumoxid-Keramik (Al₂O₃):
Hüftgelenkkugel ø 32 mm

Die untersuchten paramagnetischen wie auch diamagnetischen Materialien sind bezüglich des Profils und der Materialzusammensetzung in Tabelle 2 dargestellt. Ergänzend zur näherungsweisen Bestimmung des Einflusses von Volumen, Form und Lage der Materialien wurden zusätzlich unterschiedliche Materialkategorien mit großvolumigen Rechteck- und Rundstabprofilen unterschiedlichen Durchmessers untersucht.

2.2 Methodik

Bezugnehmend auf Bild 1, wurde der gesamte Meßaufbau durch Markierung mit einem Lichtmarker in der Art positioniert, daß das Zentrum des Phantoms mit dem Isozentrum des MR-Tomographen übereinstimmte. Zur Vermeidung von Positionierungsfehlern bei wiederholter Platzierung des Meßaufbaus (Unterbrechung des Meßvorgangs) und zur Gewährleistung reproduzierbarer

rer Messungen wurden zusätzliche Positionsmarkierungen am Patiententisch angebracht.

Vor jeder Messung lief ein Referenzscan ohne Platzierung von Fremdmaterial in transversaler und sagittaler Richtung (Bild 2) unter Verwendung der in Tabelle 1 vorgestellten Sequenzen ab. Anschließend wurde jeweils ein Materialprofil dem Meßaufbau hinzugefügt (Ausrichtung der Längsachse des Profils in x -Richtung) und dieses mit Hilfe der Wegmeßskalierung zunächst bei Markierung „Null“ (Meßabstand „0“) ausgerichtet. Für die Untersuchung des Artefaktverhaltens von Rechteckprofilen wurde sowohl horizontal (breite Profilseite in x - z -Ebene) als auch vertikal (schmale Profilseite in x - z -Ebene) gemessen. Nach der Materialausrichtung folgten die eigentlichen Materialmessungen mit den drei Sequenzen in transversaler und sagittaler Schnittebene. Nach Beendigung eines Meßintervalls wurde das Profil in 10-mm-Schritten vom Phantom in z -Richtung parallel verschoben und die nächste Messung durchgeführt. Jedes Werkstück wurde dabei so lange verschoben, bis keine Artefakte mehr zu erkennen waren.

3 Ergebnisse

Unabhängig vom Werkstoff konnten bei den verwendeten Profilen immer Bildartefakte festgestellt werden. Im einzelnen ließen sich Auslöschungen, Aufhellungen oder Konturverzerrungen unterschiedlicher Ausprägung nachweisen. Einige Beispiele hierzu werden in den Bildern 2a bis 2e vorgestellt.

Zur Bestimmung des maximalen Artefaktausmaßes im Phantom wurde in der transversalen Schnittebene eine randnahe Schicht gewählt. Die Auswertung erfolgte über das Signal-Rausch-Verhältnis ($SNR = \text{Signal-to-Noise Ratio}$) entsprechend Gl. (1) mit I_{Phantom} als Mittelwert der Signalintensität im Phantom und R_{Umgebung} als Intensitäts-Standardabweichung des umgebenden Rauschfeldes:

$$SNR = I_{\text{Phantom}} / R_{\text{Umgebung}} \tag{1}$$

Damit die Intensitäts- und Rauschwerte gleichmäßig ausgewertet werden konnten, wurde ein konstantes rechteckiges Meßfenster (ROI = Region of Interest) in die transversale Schicht und in das umgebende Rauschfeld gelegt. Die Größen der ROI im Phantom und im Rauschfeld waren identisch und entsprachen der mit Flüssigkeit gefüllten Fläche des Phantoms im transversalen Schnitt.

Zur Erfassung der Artefaktausdehnung in allen drei Dimensionen und wegen der teilweise sehr großen Artefaktbildung bei den Rechteckprofilen wurde zusätzlich die mittlere sagittale Untersuchungsschicht ausgewertet, da in dieser Schicht aufgrund der maximalen Feldstärke die größte Artefaktbildung zu erwarten war. Das prozentuale Ausmaß A der Artefakte wurde nach Gl. (2) mit F_{Artefakt} als Artefaktfläche im

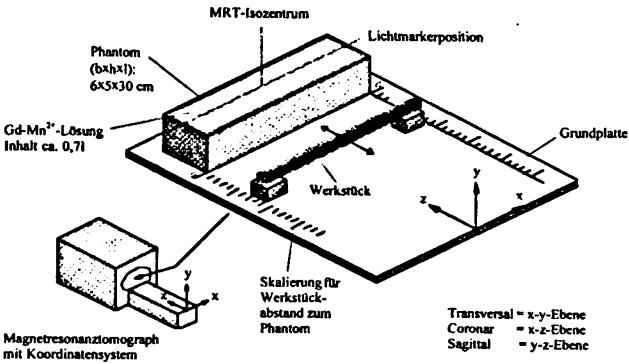


Bild 1. Schematische Lage des zu untersuchenden Materials zum Phantom und räumliche Vektoren im MR-Koordinatensystem.

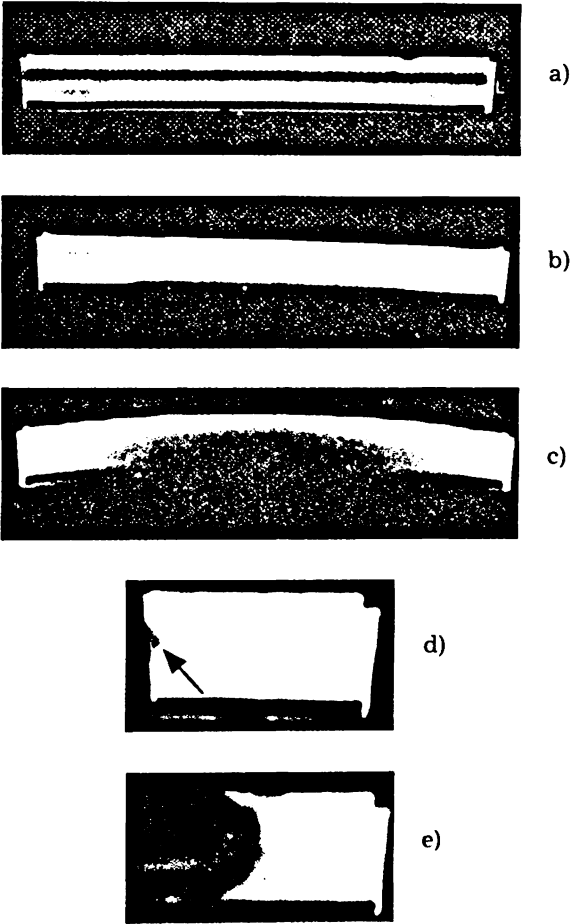


Bild 2. Beispiele für Bildartefakte in sagittaler und transversaler Schnittebene bei unterschiedlichen Materialprofilen und geringem Abstand zum Phantom. a) Auslöschungen, Rundstabprofil aus Messing (\varnothing 10 mm), transversal, GE-Sequenz; b) inverse Artefaktbildung zu a, Rundstabprofil aus Kunststoff (PMMA), transversal, GE-Sequenz; c) Auslöschung und Objektverzerrung, Rechteckprofil aus Aluminium (vertikale Ausrichtung), transversal, GE-Sequenz; d) geringe Randauslöschung, Rundstabprofil aus Aluminium (\varnothing 10 mm), sagittal, GE-Sequenz; e) große Tiefenauslöschung, Rechteckprofil aus Messing (vertikale Ausrichtung), sagittal, GE-Sequenz.

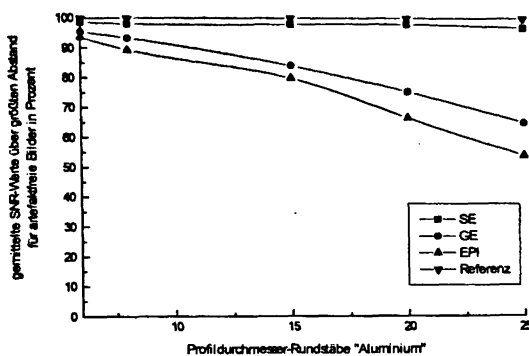


Bild 6. Vergleich der SE-, GE- und EPI-Sequenz hinsichtlich Abbildungsstabilität bzw. Artefaktanfälligkeit zwischen unterschiedlichen Aluminium-Rundstabprofilen.

4 Diskussion

Die Auswertung der ermittelten Meßkurven hatte das Ziel, die konstruktive Anwendbarkeit der eingesetzten para- und diamagnetischen Materialien im MR-Tomographen zu ermitteln und die Bildgebung auf den Einfluss unterschiedlicher Sequenzen hin zu verifizieren.

Im Rahmen der Auswertung hinsichtlich der konstruktiven Anwendbarkeit wurde der Mindestabstand zwischen den verwendeten Materialprofilen zum Phantom ermittelt, bei dem keine Artefakte mehr vorhanden waren. In diesem Zusammenhang ergab die Bildauswertung der para- und diamagnetischen Rechteckprofile, daß austenitischer Stahl die größten Magnetfeldstörungen bzw. die größten Bildartefakte (Auslöschungen und Verzerrungen in transversaler und sagittaler Schnittebene) verursachte, was sich mit großer Bestimmtheit auf die hohen Suszeptibilitätswerte (paramagnetisch, $k > 1$) dieses Werkstoffes zurückführen läßt. Trotz der geringeren magnetischen Suszeptibilität von Kupfer (diamagnetisch, $k < 1$) konnte auch hier eine relativ einflußreiche Artefaktbildung durch das Kupferprofil festgestellt werden. Vermutlich spielt hierbei die hohe elektrische Leitfähigkeit eine maßgebende Rolle, wodurch während des Scannens zusätzliche lokale Magnetfelder durch das Material induziert werden [6].

Vergleichsweise geringe Materialabstände für artefaktfreie Schnittbilder konnten, bei der Untersuchungsreihe „Rechteckprofile“, mit dem Messing- und Aluminiumprofil erreicht werden, wobei die Aluminiumlegierung die kleinste Artefaktbildung verursachte. Es zeigte sich dennoch unabhängig vom verwendeten Werkstoff eine große lageabhängige Artefaktbildung der Profile (horizontal, vertikal). Ein wesentlich geringerer Störeinfluß auf die Feldhomogenität konnte bei horizontaler Lage der Profile (breite Profilseite in x - z -Ebene) erreicht werden.

Bei einem Vergleich der metallischen Rundstäbe gleichen Durchmessers (Kategorie 2) zeigte sich wieder, daß die Aluminiumlegierung die kleinsten Mindestabstände für artefaktfreie Bilder benötigt. Geringe Artefakte zeichneten sich auch bei dem Rundstab aus Bronze (CuSn6) ab. Insgesamt konnten die niedrigsten

Material-Mindestabstände bzw. die geringsten Bildartefakte (Aufhellungen) bei den nichtmetallischen Werkstoffprofilen aus Kunststoff (PVC, PMMA) und Faserverbundwerkstoff (GFK, CFK) als auch bei der Hüftgelenkkugel aus Aluminiumoxidkeramik beobachtet und verifiziert werden. Mit der entsprechenden Sequenzwahl würden sich diese Materialprofile bereits bei 10 bis 30 mm Materialabstand von der Untersuchungsschicht für artefaktfreie Schnittbilder einsetzen lassen.

Aufgrund der günstigen Eigenschaften der verwendeten Aluminiumlegierung (AlMgSi0,5F22) in bezug auf die Artefaktbildung wurde ein Vergleich zwischen den Aluminiumrundstäben mit unterschiedlichem Durchmesser (6 bis 25 mm) angestellt. Hierbei zeichneten sich trotz der zunehmenden Materialvolumina zwar stetige, aber nur geringfügige Unterschiede im Artefaktverhalten ab, so daß die Rundstäbe mit kleinerem Profildurchmesser ($\phi = 6 \dots 15$ mm) bereits ab 10 mm und die größeren Profildurchmesser ($\phi = 15 \dots 25$ mm) ab 30 mm Mindestmaterialabstand artefaktfreie Bilder lieferten.

In Übereinstimmung mit [1] konnten bei Gegenüberstellung der transversalen Schnittbilder konträre Darstellungen der Bildartefakte in bezug auf paramagnetische und diamagnetische Materialien beobachtet werden. Beim paramagnetischen Material ($\kappa > 0$) zeigten sich dunkle Artefaktbereiche mit hellem Hintergrund, bei den diamagnetischen Profilen ($\kappa < 0$) zeichneten sich an der gleichen Stelle im Schnittbild helle Artefaktbereiche mit dunklem Hintergrund ab. Zur Veranschaulichung dieses Effektes sind hierzu Beispiele in Bild 4 aufgeführt. Vermutlich läßt sich dieser Effekt auf die unterschiedliche Magnetisierung dieser Materialien zurückführen. Aus physikalischer Sicht verläuft die Magnetisierung bei paramagnetischen Materialien in Richtung des Magnetfeldes und bei diamagnetischen Materialien in entgegengesetzter Richtung des Magnetfeldes. Die Autoren aus [1] beschreiben zusätzlich in ihren Ergebnissen, daß sich die Artefaktabbildung bei paramagnetischen und diamagnetischen Werkstoffen, entsprechend der Magnetisierung dieser Werkstoffe, in entgegengesetzter Richtung verhält.

Zur Abklärung des Ausmaßes auf die Artefaktbildung sowie der Darstellungsstabilität von MR-Sequenzen unter Verwendung von Fremdmaterialien wurden in Anlehnung an [2] vom Charakter her verschiedene, im täglichen klinischen Einsatz jedoch gebräuchliche MR-Sequenztypen [Spin-Echo (SE), Gradienten-Echo (GE), Echo-Planar-Imaging (EPI)] getestet und ausgewertet. Aus eigenen klinischen Untersuchungen konnte bereits festgestellt werden, daß die SE-Sequenz eine stabile MR-Sequenz darstellt, daß die GE-Sequenz eine erhöhte Sensitivität gegenüber Suszeptibilitätsartefakten aufweist und daß bei der EPI-Sequenz mit ausgeprägten Suszeptibilitätserscheinungen zu rechnen ist.

Wie zu vermuten war, konnte bei der Auswertung der Schnittbilder eine starke Abhängigkeit zwischen den verwendeten Sequenztypen und dem Ausmaß der Bildartefakte festgestellt werden. Es zeigte sich, daß der Störeinfluß auf die Bildgebung in der Reihenfolge Spin-Echo-, Gradienten-Echo- und Echo-Planar-Imaging-Sequenz zunimmt. Im Rahmen der Untersuchung der Sequenzstabilität (Qualität der Bilddarstellung) wurden die werkstoffgleichen Aluminiumprofile mit unterschiedlichem Durchmesser ausgewertet. Für die Bewertung der Sequenzstabilität wurde der mittlere SNR-Wert über einen definierten Abstandsbereich für jede Meßkurve gebildet. Dabei stellte sich heraus, daß die SE-Sequenz gegenüber der GE- und EPI-Sequenz im Mittel eine hohe Konstanz in der Bildqualität trotz des variierenden Profildurchmessers aufweist und somit von den benutzten Sequenztypen als die stabilste MR-Sequenz angesehen werden kann.

5 Schlußfolgerung

Generell ist der Einsatz der untersuchten Werkstoffe bzw. Materialprofile im MR-Tomographen unter Berücksichtigung der ermittelten Mindestabstände für artefaktfreie Schnittbilder (Bild 1) denkbar. Für die im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten Materialien würden sich für konstruktive MR-Anwendungen im Nahbereich der zu untersuchenden Schichten folgende Werkstoffe am besten eignen: Aluminium und Bronze als metallischer Werkstoff, alle Kunststoff- und Faserverbundwerkstoffe (PVC, PMMA, CFK, GFK) und auch Aluminiumoxid als keramisches Material im Bereich der nichtmetallischen Werkstoffe.

In bezug auf die verwendeten Sequenztypen sollte nach Möglichkeit eine Spin-Echo-Sequenz (SE) ver-

wendet werden. Sind jedoch kürzere Scanzeiten erwünscht, dann wäre eine Gradienten-Echo-Sequenz (GE) zu empfehlen.

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Krebshilfe für das Zustandekommen dieser Untersuchungen, die im Rahmen eines Forschungsprojektes (Nr. 70-1954) durchgeführt wurden.

Literatur:

- [1] Camacho, C. R.; D. B. Plewes, R. M. Henkelman: Non susceptibility Artifacts Due to Metallic Objects in MR Imaging. *JMRI* 5 (1995), 75-88.
- [2] Chauvel, B.; G. Cathelineau, S. Balac, J. Lecerf, J. de Certaines: Cancellation of Metal-Induced MRI Artifacts with Dual-Component Paramagnetic and Diamagnetic Material: Mathematical Modelization and Experimental Verification. *JMRI* 6 (1996), 936-938.
- [3] Cohen, M. S.: A collection of MRI artifacts. http://128.97.134.216/BMD_HTML/SharedCode/MR-Artifacts/MRArtifacts.html 1997.
- [4] Lewin, J.; J. Duerk, V. Jain, C. Peterslidge, C. Chao J. Haaga: Needle Localization in MR-Guided Biopsy an Aspiration: Effects of Field Strength, Sequence, and Magnetic Field Orientation. *AJR* 166 (1996), 1337-1345.
- [5] Reber, R.; R. Bernays, P. Krayenbühl, T. Brandsberg, B. Romanowski, E. Wintermantel, Y. Yonekawa: Entwicklung einer Hirntumorbiopsienadel aus faserverstärktem Polymer für die interventionelle MR-Technik. *Biomedizinische Technik* 41 (1996), Ergänzungsband 1.
- [6] Shellock, F.; V. Shellock: eramic Surgical Instruments: Ex vivo Evaluation of Compatibility with MR Imaging at 1,5 T. *JMRI* 6 (1996), 954-956.

868

Korrespondenzanschrift:
Universitätsklinikum Charité
Campus Virchow
Strahlen- und Poliklinik, MRT-Labor
Dr. med. H. Oellinger
Augustenburger Pl. 1, D-13353 Berlin